

基于四路对脊鳍线的毫米波固态功率放大器设计

董亮, 卫明

(中国电子科技集团公司第三十六研究所, 浙江 嘉兴 314033)

摘要: 介绍了一款 Q 波段采用对脊鳍线微带过渡结构的 5 W 固态集成功率放大模块。利用 HFSS 软件对四路波导 T 型节以及对脊鳍线微带过渡结构分别进行模拟仿真, 仿真结果表明, 四路波导 T 型节插入损耗可以控制在 0.1 dB 以内, 对脊鳍线微带过渡结构插入损耗可以控制在 0.1 dB 以内。对四路合成/分配器进行背对背安装, 并进行直通测试, 测试结果表明, 在 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内插入损耗在 2 dB 以内, 可以推算合成效率大于 80%。选用 2 W 的功放 MMIC 作为实验样片进行装配, 采用金丝键的方式进行射频连接。对整个功率放大模块进行测试, 测试结果表明, 在频率 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内, 饱和功率输出大于 5.7 W, 增益大于 10.5 dB, 效率大于 9.5%。该结构在毫米波功放领域具有广阔的应用前景。

关键词: 对脊鳍线; 毫米波; 固态功率放大器; 插入损耗; 合成效率

中图分类号: TN73

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191221

中文引用格式: 董亮, 卫明. 基于四路对脊鳍线的毫米波固态功率放大器设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(8): 17-20.

英文引用格式: Dong Liang, Wei Ming. Design of solid-state power amplifier based on 4-ways antipodal finline in millimeter wave[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(8): 17-20.

Design of solid-state power amplifier based on 4-ways antipodal finline in millimeter wave

Dong Liang, Wei Ming

(No.36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314033, China)

Abstract: An design of a 5 W solid-state power amplifier in Q band by using antipodal finline-to-microstrip transition was presented. The four-way waveguide T-junction and antipodal finline-to-microstrip is designed and simulated through the high frequency structure simulator(HFSS). The simulation result show that the insert loss of four-way T-junction is less than 0.1 dB and the insert loss of antipodal finline-to-microstrip is less than 0.1 dB. The four-way power combiner/divider is made and test. The test result shows that the insert loss of four-way power combiner/divider is less than 2 dB in the the frequency range of 43.5 GHz~45.5 GHz, and the synthesis efficiency is more than 80%. A 2 Watt level die was selected for the amplifier module and the gold boding wire is connected the die to the microstrip. The test result shows that saturation power is more than 5.7 W, gain is more than 10.5 dB and efficiency is more than 9.5% in the frequency range of 43.5 GHz~45.5 GHz. This structure has a very broad application prospect in the field of millimeter wave power amplifier.

Key words: antipodal finline-to-microstrip; millimeter wave; solid-state power amplifier; insert loss; synthesis efficiency

0 引言

在许多毫米波段的系统设备(如: 雷达、通信对抗、通信设备)中, 毫米波固态功率放大器均为其重要组成部分。随着对功率等级要求的不断提高, 各领域主要做两方面的工作: (1)通过半导体工艺不断提升, 使得功放单片的功率等级不断增加; (2)通过毫米波功率合成技术来实现大功率输出^[1-5]。

在毫米波合成领域, 由于波导结构插损更低, 因此传输结构往往采用此种结构类型, 这就要求在使用毫米波单片集成电路中低损耗、易制造的宽带矩形波导到微带的过渡。对脊鳍线具有带宽较宽、插损

低、电路简单易实现的特点, 被广泛应用到毫米波电路中^[6-9]。

本文基于四路波导 T 型节结构结合对脊鳍线过渡, 设计了一款 Q 频段的固态功率放大器。整个设计有 3 个关键点: (1)设计对脊鳍线结构完成微波从矩形波导到微带的过渡; (2)四路波导 T 型节功率合成分配器设计; (3)采用金丝键合技术工艺连接裸片与微带电路以及供电电路。之后利用微组装机工艺完成对功放模块的安装, 并对其进行测试, 测试结果表明, 该功放模块在频率 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内, 饱和功率输出大于 5.7 W, 增益大于 10.5 dB, 效率大于 9.5%。

1 对脊鳍线过渡的基本原理

传统波导-微带的对脊鳍线结构如图 1 所示。该对脊鳍线在基片两面进行制作,主要作用是将波导电场转变成微带的 TEM 传输模式。该结构的区域 1 和区域 2 是对脊鳍线过渡,它将矩形波导中的 TE₁₀ 模的电场集中并旋转 90°,将 TE₁₀ 模式转变为准 TEM 模。区域 3~区域 5 是将对脊鳍线转变成微带线。

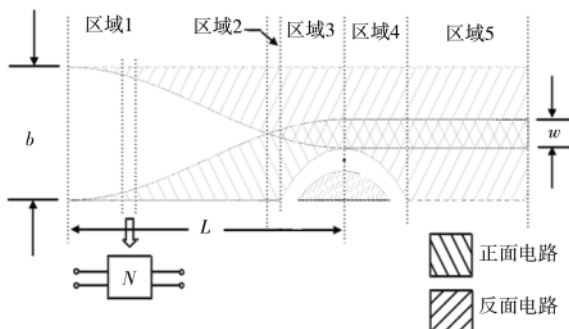


图 1 对脊鳍线过渡段结构

本文对 43.5 GHz~45.5 GHz 频段的波导微带过渡分别进行设计,其结构采用图 1 所示的余弦过渡形式,其设计公式为^[5]:

$$W(z) = \left[1 - \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{L}\right) \right] \frac{b+w}{2} \quad (1)$$

式中, w 为 50 Ω 微带线的宽度, z 为鳍线传输线的纵向坐标, L 为过渡段长度, b 为波导高度。

2 四路功率合成/分配器仿真与测试

2.1 对脊鳍线的设计与仿真

利用电磁场仿真软件 HFSS 对鳍线过渡结构进行建模仿真,其建模如图 2 所示。

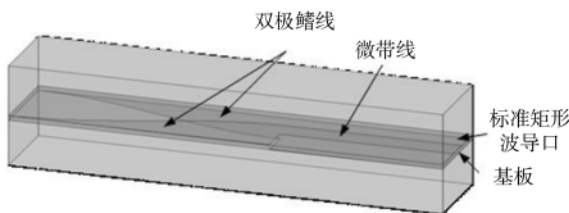


图 2 波导-微带对脊鳍线过渡的 HFSS 结构仿真

图 3 为经过仿真软件优化后的 43.5 GHz~45.5 GHz 频段波导微带转换结构的 S₁₁ 参数曲线仿真结果,仿真结果表明,在 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内, S₁₁ 小于 -20 dB。

2.2 四路波导 T 型节仿真

利用电磁场仿真软件 HFSS 对四路波导 T 型节结构进行建模仿真,其建模如图 4 所示。

图 5 所示的是经过仿真软件优化后的 43.5 GHz~45.5 GHz 频段四路波导 T 型节结构的 S₂₁ 参数曲线仿真结果。仿真结果表明,在 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内, S₂₁、S₃₁、S₄₁、S₅₁ 小于 6.1 dB。考虑理想四路合成器 S₂₁、S₃₁、S₄₁、S₅₁ 在 6 dB,因此仿真插入损耗在 0.1 dB 以内。

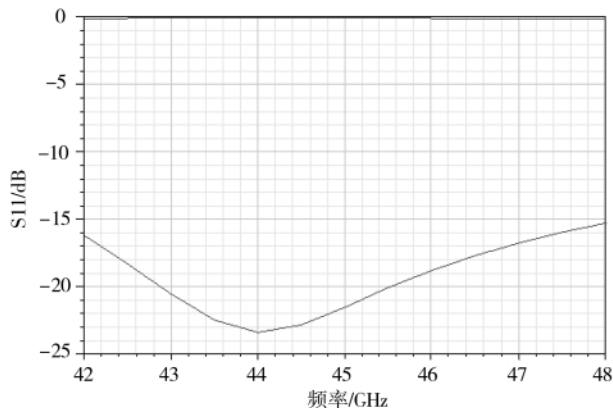
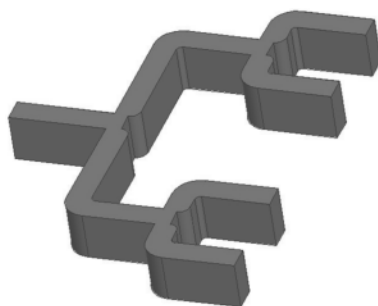
图 3 波导-微带对脊鳍线过渡的 HFSS 结构 S₁₁ 参数仿真

图 4 四路波导 T 型节 HFSS 结构仿真

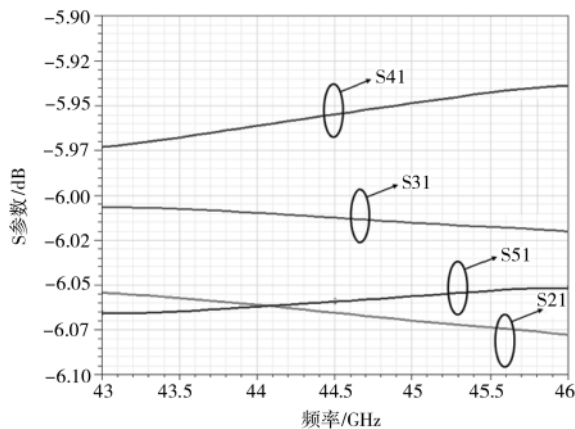
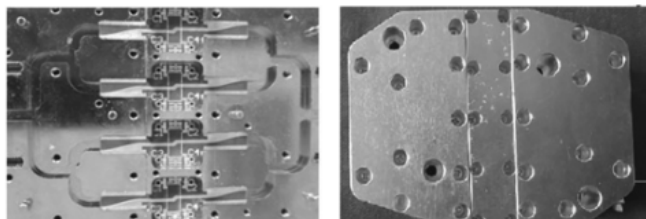


图 5 四路波导 T 型节 S 参数仿真结果

2.3 四路功率合成/分配器的安装与测试

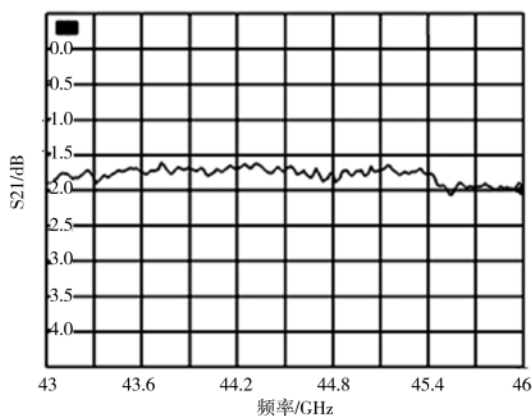
四路功率合成/分配器安装图如图 6 所示,波导结构由底板和 3 个上盖板组成,中间挖槽,分别对应两个背靠背四路波导 T 型节结构。在波导的中间挖一浅凹槽,用以放置对脊鳍线,对脊鳍线中间是一段标准 50 Ω 微带连接。微带采用 Rogers 4350 板,介电常数 2.2。

图 7 所示的是四路功率合成/分配器实测结果,考虑直通标准 50 Ω 微带线插损 0.1 dB 左右,实测结果表明,该背靠背结构在 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内插损 S₂₁ 小于 2 dB, S₁₁ 在 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内小于 13 dB,可以推算该类型的功率合成器的合成效率大于 80%^[10]。

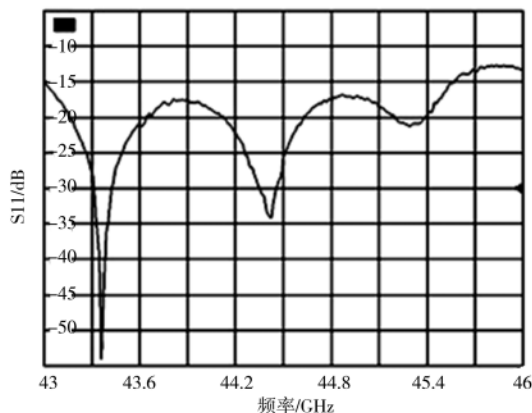


(a)内部图 (b)外形图

图6 四路功率合成/分配器装配图



(a)S21 参数实测值



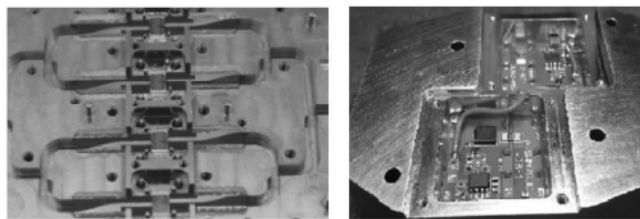
(b)S11 参数实测值

图7 四路功率合成/分配器实测图

3 功率放大模块装配与测试

本文选用了饱和功率输出 2 W 的 MMIC 作为实验裸片。栅极电压 $V_g = -0.6$ V, 漏极电压 $V_s = 6$ V, 模块内部 MMIC 的微组装以及供电电路安装图如图 8 所示。微波通过矩形波导输入, 波导为 Q 波段标准波导。经过对脊鳍线过渡, 将矩形波导中的微波耦合到微带中, 通过金丝键合技术将微带中微波信号加到裸片上, 微波信号经过功率放大芯片放大后再通过金丝键合技术加载到微带上, 最后通过对脊鳍线耦合至矩形波导中, 通过四路波导 T 型节功率合成输出^[11-13]。

供电需要保证时序的准确性, 上电时先加上栅压, 后加漏压; 去电的时候, 先去漏压, 后去栅压。栅极负压 -0.6 V 由 MAX840 负压模块产生, 通过三极管以及一



(a)功放模块内部图 (b)功放模块背部图

图8 功放模块内部 MMIC 装配图以及供电电路安装

个开关模块控制漏极电压 6 V, 这样就能保证供电电路的时序性。在功放模块的背部挖空, 供电板放置在空腔中, 通过绝缘子给功放芯片供电。功放模块实物图如图 9 所示。

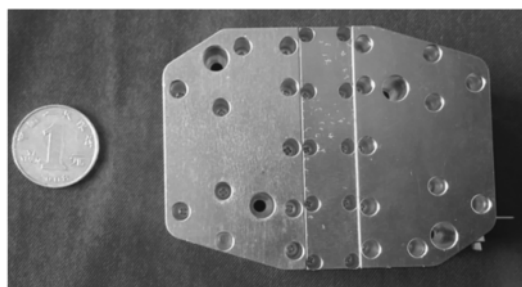
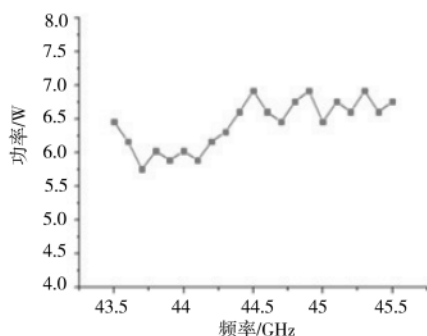
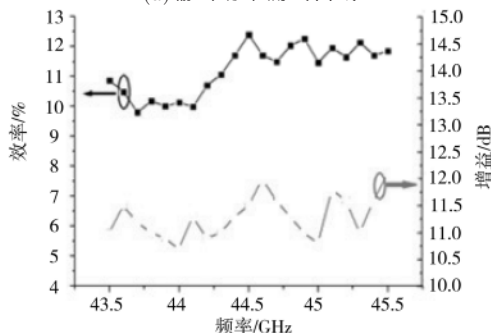


图9 功放模块实物图

图 10(a)所示的是该模块的饱和功率输出曲线实测数据图。可以从图中看出, 在 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内饱和功率输出大于 5.7 W。图 10(b)所示的是该模块的增益曲线以及效率实测数据图。效率曲线的纵坐标在左



(a)输出功率测试曲线



(b)效率及增益测试曲线

图10 功放模块实测数据

侧,增益曲线的纵坐标在右侧,图中分别用箭头表示。由图 10(b)可以看出,在 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内增益大于 10.5 dB,效率大于 9.5%。

4 结论

本文基于四路对脊鳍线电路完成了 Q 波段 5 W 固态功率放大器的设计。模拟仿真了对脊鳍线波导微带过渡结构的 S 参数,以及四路波导 T 型节的 S 参数,仿真结果表明,该结构的插入损耗都在 0.1 dB 以内,可以满足毫米波功放模块的设计要求。基于仿真结构,本文制作了四路功率合成/分配器背靠背实物图,通过实际测试,该背靠背结构的插入损耗可以控制在 2 dB 以内,可以推算该结构合成器合成效率大于 80%。本文选择一款 2 W 量级的 MMIC 功放裸芯片作为实验样片,基于此设计了一个 Q 波段毫米波固态功率放大模块,并添加了供电电路。对该模块进行测试,测试结果表明在频率 43.5 GHz~45.5 GHz 频段内,饱和功率输出在 5.7 W 以上,增益大于 10.5 dB,效率在 9.5% 以上。本文只针对 2 W 量级的 MMIC 做了设计,为获得功率等级更高的功放模块,可以选择功率量级更高的功放单片,以本文中的电路做参考来设计毫米波功放模块。该结构具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Cheng Naishuo, Jia Pengcheng, RENSCH D, et al. A 120W X-band spatial combined solid-state amplifier[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques, 1999, 47(3): 2557-2561.
- [2] 张峻齐.毫米波超宽带径向功率合成技术研究[D].成都:电子科技大学,2017.
- [3] LI G, SONG K, ZHANG F, et al. Novel four-way multilayer SIW power divider with slot coupling structure[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2015, 25(12): 799-801.
- [4] LI Y, ZHANG Y, ZHU G, et al. A W-band miniature power divider based on E-faced-folder magic-T junction[C]. IEEE Mtt-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and the Applications. IEEE, 2016: 1-3.
- [5] 梁荣江,李思敏,周海京.一种改进型毫米波开槽波导空间功率分配合成网络[J].电子技术应用,2009,35(1): 102-105.
- [6] Zhang Yunchi, RUIZ-CRUZ J A, ZAKI K A. A waveguide to microstrip inline transition with very simple modular assembly[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 20(9): 480-482.
- [7] 孙静.W 波段对脊鳍线过渡的波导微带转换设计[J].宇航计测技术,2015,35(3): 10-13.
- [8] 王小伟,李家胤,周翼鸿.一种 Ka 波段波导微带鳍线转换结构[J].空间电子技术,2009,35(3): 98-102.
- [9] HUANG Z Y, XIANG X Z, GOU Y Y. T-type power divider/combiner based on waveguide-microstrip structure in W-band[C]. 2017 2nd International Conference on Communication and Information Systems. Wuhan, 2017: 92-96.
- [10] BELAID M, WU K. Quasi-optical power amplifier using TEM waveguide concept[C]. IEEE 2001 MIT-S Digest, 2001, 3: 1835-1839.
- [11] TAKAGI K, NG C Y, SAKURAI H, et al. GaN MMIC for Ka-band with 18W[C]. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, New Orleans, USA, 2015, 3: 1-4.
- [12] PEREZ J A G, KOSMOPOULOS S, GOUSSETIS G A. compact 12-way slotted waveguide power combiner for Ka-band applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(2): 135-137.
- [13] Wi Shaobing, Gou Fangjin, Gao Jianfeng, et al. W-band AlGaIn/GaN MMIC PA with 3.1 W output power[C]. International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China. IEEE, 2017, 2: 1-4.
- [14] Li Xiaofeng, Peng Lin. MZR resonators etched in microstrip patch with enhanced bandwidth and reduced size[J]. Progress in Electromagnetics Research M(PIER M), 2018, 76(12): 197-205.
- [15] 常伟,孙学宏,刘丽萍,等.OAM 介质谐振器阵列天线的研究[J].电子技术应用,2018,44(8): 90-93.

(收稿日期:2019-11-12)

作者简介:

董亮(1987-),通信作者,男,硕士,高级工程师,主要研究方向:射频及微波功放,E-mail: uestc_dl@163.com。

卫明(1980-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:射频及微波功放。

(上接第 16 页)

IEEE, 2007, 55(12): 3710-3712.

- [11] LEE S W, LEE J H. Electrically small MNG ZOR antenna with multilayered conductor[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 724-727.
- [12] 周凯,王睿乔,赵志恒.面向 5G 高隔离度 4 单元 MIMO 手机天线设计[J].电子技术应用,2019,45(11): 1-5, 9.
- [13] YANG S Y, NG M K M. A bisected miniaturized ZOR antenna with increased bandwidth and radiation efficiency[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 159-162.

- [14] Li Xiaofeng, Peng Lin. MZR resonators etched in microstrip patch with enhanced bandwidth and reduced size[J]. Progress in Electromagnetics Research M(PIER M), 2018, 76(12): 197-205.
- [15] 常伟,孙学宏,刘丽萍,等.OAM 介质谐振器阵列天线的研究[J].电子技术应用,2018,44(8): 90-93.

(收稿日期:2020-02-24)

作者简介:

李晓峰(1970-),男,硕士,主要研究方向:微波网络、天线理论与技术、电磁测量等。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所